Der Widerstand des Graphits in Richtung der Hauptkrystallachse und seine Aenderung durch Magnetisierung.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt

von der Philosophischen Fakultät

der

Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Berlin.

ACAD. LAND. BAT. BIBL.

Von

George E. Washburn
aus Lexington, Mass., Ver. Staaten.

Tag der Promotion: 5. August 1914.

16

Referenten:

Professor Dr. **Rubens.**

Professor Dr. **Planck**

Emil Ebering, Berlin NW. 7, Mittelstr. 39.

Meinen Eltern

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546508_0063

Bezeichnungen.

R = Feldfreier Widerstand.
R′ = Widerstand im Felde.
$\mathfrak{J}$ = Stromvektor.
$\mathfrak{A}$ = Achsenvektor.
$\mathfrak{H}$ = Feldvektor.
φ = Winkel ($\mathfrak{A}$, $\mathfrak{H}$) oder ($\mathfrak{J}$, $\mathfrak{H}$).

$$\Delta = \left(\frac{R'-R}{R}\right)_{\varphi=\varphi} - \left(\frac{R'-R}{R}\right)_{\varphi=90^0}$$

k = absoluter spezifischer Widerstand in Richtung der Hauptachse.

Einleitung.

Wegen seines in vieler Hinsicht abnormalen Verhaltens hat sich die Aufmerksamkeit der Physiker neuerdings dem Graphitkristall zugewandt. O w e n[1] hat z. B. gefunden, daß die diamagnetische Susceptibilität für die Richtung parallel der Hauptachse — eben dieselbe Richtung, die hier in Betracht kommt —, viel größer als die für Wismuth ist, und zwar ist sie bei weitem die größte bis jetzt beobachtete diamagnetische Susceptibilität. Bald nachher hat d e H a a s die durch Analogie mit Wismuth naheliegende Erwartung ausgesprochen, daß auch die Widerstandsänderung im Magnetfeld beim Graphitkristall sich als groß herausstellen würde. R o b e r t s[2] fand tatsächlich, daß dieser Effekt für den Fall, daß der Kristall im Felde mit seiner Hauptachse parallel der Feldrichtung orientiert ist und daß der Strom im Kristall senkrecht zur Achse[2], also auch senkrecht zum Felde fließt

1. Morris Owen, Ann. d. Phys. 37, p. 657 (1912).
2. D. E. Roberts, Ann. d. Phys. 40, p. 453 (1913).

($\mathfrak{H} \perp \mathfrak{A} \parallel \mathfrak{H}$) alle bisher beobachteten weit übertrifft. Bei der Temperatur der flüssigen Luft und in einem Felde von 50 Kilogauß betrug der Widerstand fast das Hundertfache des feldfreien Widerstandes.

In Anbetracht dieser Ergebnisse schien auch eine Untersuchung des Hall-Effektes für verschiedene Richtungen im Kristall wünschenswert und Professor H. du Bois schlug mir vor, eine solche Untersuchung zu machen. Eine Beobachtung, die im Laufe dieser Untersuchung des Hall-Effektes gemacht wurde, veranlaßte mich aber, meine Aufmerksamkeit auf die Eigenschaften des Kristalles parallel der Achse zu richten, bildete also den eigentlichen Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit.

Hergang der Untersuchung.

Der Halleffekt sollte nämlich ermittelt werden für eine Platte, die derart geschnitten war, daß die Verbindungslinie der beiden sekundären Hallelektroden, S, S′ (s. Figur), parallel der

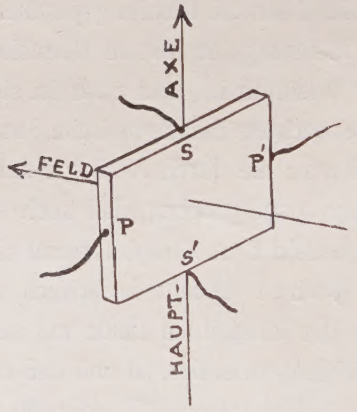


Fig. 1.

P, P′ = primäre Elektroden; S, S′ = sekundäre Elektroden.

3. Dieser Fall ist scharf von dem vorliegenden, wobei der Strom stets parallel der Achse fließt ($\mathfrak{H} \parallel \mathfrak{A}$), zu unterscheiden.

Hauptachse gerichtet war. Nun erforderte die Meßmethode eine Bestimmung des im ganzen sekundären Kreis befindlichen Widerstandes einschließlich desjenigen der Platte zwischen S und S'.

Diese Bestimmung wurde zuerst mit der Platte außerhalb des Feldes gemacht, weil der Widerstand der Platte und die durch das Feld hervorgerufene Aenderung desselben gegen die anderen im sekundären Kreis vorhandenen Widerstände vermutlich klein waren; doch wurde einmal zur Kontrolle eine Messung gemacht mit der Platte im Felde. Dabei ergab sich — und das Ergebnis wurde durch mehrmaliges Wiederholen der Messung bestätigt — bei einem Feld von ca. 25 Kilogauß ein Wert für den Widerstand, der größer war als der feldfreie Wert, und zwar um nicht weniger als 0,3 Ohm. Unter der ganz willkürlichen Annahme gleicher Leitfähigkeit für die Richtung parallel und senkrecht der Achse wurde nun der Widerstand der Platte zwischen S und S' auf höchstens einige Hundertstel Ohm geschätzt. Daher glaubte ich für diesen Fall, den wir kurz als den Fall $(\mathfrak{J} \parallel \mathfrak{A} \perp \mathfrak{H})$ bezeichnen können, eine sehr große relative Widerstandsänderung im Magnetfeld gefunden zu haben, und zwar größer als für den Fall $(\mathfrak{J} \parallel \mathfrak{A} \perp \mathfrak{H})$. (Roberts l. c.)

Wegen der Unmöglichkeit, den Widerstand der Hallplatte zwischen ihren sekundären Elektroden zu messen, konnte mit dieser Anordnung die Frage nicht weiter geprüft werden. Es wurde also ein Präparat hergestellt, wobei der Strom in gleicher Weise wie der sekundäre Strom durch die Hallplatte parallel der Hauptachse, d. h. senkrecht zu den Spaltebenen, floß, und an dem der Widerstand genau bestimmt werden konnte.

Dieses geschah in folgender Weise: Aus einem rohen Stück Graphit mit möglichst ebenen Spaltflächen wurde durch

Einbetten in Schellack und Aussägen mit einer feinen Laubsäge ein Streifchen senkrecht zu den Spaltebenen herausgeschnitten. Dieses Streifchen wurde dann wieder an zwei Stellen senkrecht zu seiner Länge durchgeschnitten. Die zwei Endspaltflächen des resultierenden kleinen Graphitblocks wurden durch sorgfältiges Abkratzen des Schellacks bloßgelegt. An diese Flächen wurden dann die feinen Kupferzuleitungen durch galvanisches Verkupfern befestigt. Da die sonst unwesentliche Methode zur Widerstandsbestimmung nicht sehr empfindlich war und da zunächst noch an die Annahme gleicher Leitfähigkeit für die Richtung parallel und senkrecht zur Achse festgehalten wurde, so wählte ich die Querdimensionen dieses ersten Präparats möglichst klein, um einen möglichst hohen Widerstand zu erzielen und zwar war der Graphitblock nur 0,1 mm dick, 0,3 mm breit und 0,4 mm lang.

Der Widerstand betrug indessen wider Erwarten ungefähr 1 Ohm. Dieses führt zu einem Wert des spezifischen Widerstandes von der Größenordnung 10^{-2} Ohm pro Kubikzentimeter, etwa das Hundertfache des spezifischen Widerstandes für die Richtung senkrecht zur Achse[4]. Daß der hohe Widerstand nicht durch größere makroskopische Spalten im Präparat verursacht wurde, schien wahrscheinlich, weil beim Verkürzen der Platte um die Hälfte der Widerstand proportional auf etwa die Hälfte seines früheren Wertes zurückging.

Nach diesem ersten Versuch schien es wahrscheinlich, daß man beim Graphit mit einem sehr großen Unterschied in den Leitfähigkeiten senkrecht bzw. parallel zur Achse zu tun hat. Danach ist die hohe Widerstandszunahme der Hallplatte nicht

---

4. Vgl. D. E. Roberts, l. c. p. 455.

durch eine hohe relative Widerstandsänderung im Feld zu erklären, sondern beruht bereits auf einem unerwartet großen Wert des feldfreien Widerstandes zwischen den sekundären Elektroden, der sich dann relativ nur verhältnismäßig wenig im Felde zu ändern brauchte, um die beobachtete absolute Zunahme des Widerstandes zu bedingen.

Ich wandte mich nun der Aufgabe zu, den spezifischen Widerstand parallel der Hauptachse näher zu bestimmen. Es war von vornherein klar, daß man beim Graphit und besonders für die Richtung senkrecht zu den Spaltebenen nicht auf allzu große Genauigkeit rechnen durfte. Da mir aber sehr gutes Material zur Verfügung stand, so schien die Hoffnung, eine leidliche Uebereinstimmung der Resultate zu erzielen, berechtigt.

Material und Herstellung der Präparate.

Die Herstellung von Graphitpräparaten, bei denen die Stromrichtung parallel der Hauptkristallachse liegt, ist, so viel mir bekannt, noch nie unternommen worden. Sie war bedeutend schwieriger als im anderen Fall, bei dem der Strom senkrecht zur Achse fließt, da für diesen Fall eine einfache Abspaltung der Kristallschichten ein zur Untersuchung geeignetes Präparat ergibt. Da nun die Vervollkommnung der Präpariermethode den Hauptteil der Arbeit bildet, und da diese Methode bei späteren Untersuchungen über die Richtung parallel der Hauptachse von Nutzen sein könnte, so sei hier im einzelnen darauf eingegangen.

Die präparative Aufgabe bestand darin, erstens, aus dem rohen Stück Graphit eine Platte mit möglichst von natürlichen Spaltflächen gebildeten breiten Flächen und sauberen, der Hauptachse möglichst parallelen, Rändern herauszuschneiden, ohne

dabei die überaus zarte Graphitstruktur zu beeinträchtigen; zweitens war ein sicherer, auf den breiten Flächen scharf begrenzter Kontakt mit dieser Platte zu machen. Der Kontakt durfte sich z. B. auch nicht um 0,01 mm über die Ränder herum erstrecken, denn bei der geringen Dicke der Platte (0,1—0,2 mm) würde dieses zu einem großen Fehler im Widerstand führen.

In der Hauptsache wurden drei verschiedene Arten von Präparaten hergestellt, die im folgenden als „Kupferpräparate", „Quecksilber-Zement-Präparate" und „Quecksilber-Paraffin-Präparate" nach den bei ihnen verwendeten Materialien bezeichnet sind.

Für die Kupferpräparate wurden einige leidliche, aus einer Sendung gemeinen Ceylon graphits (G, I) von Merck herausgesuchten Stücke benutzt. Bei einem Präparat jedoch kam ein gut orientierter, aber stark verbogener mexikanischer Graphit (G, VII) zur Verwendung. Die rohen Ceylonstücke hatten bis zu einem Quadratzentimeter Oberfläche und waren bis zu 2 mm dick. Ihre Spaltflächen zeigten nahezu ebene Stellen, obgleich die feinen Knicklinien, die den charakteristischen Winkel von 60° miteinander bilden, und als ein Zeichen einer mehr oder weniger ausgedehnten Störung der Struktur anzusehen sind, fast über der ganzen Fläche ausgebreitet erschienen. Bei derartigen natürlichen Platten sind die basischen Spaltebenen parallel der Ebene der Platte, während die Hauptachse auf dieser Ebene senkrecht steht.

Die Kupferpräparate wurden in ähnlicher Weise wie das soeben beschriebene Versuchspräparat hergestellt, nur wurden auf Grund der gewonnenen Kenntnis über die Leitfähigkeit die Querdimensionen größer genommen; auch wurde auf den breiten (Spalt-) Flächen der Platte der Schellack, statt abgekratzt zu werden, bis auf eine sehr dünne Schicht abgeschliffen und dann

sorgfältig abgespaltet, so daß die Graphitplatte sich am Ende in einem kleinen Rahmen von Schellack befand. Diese wurde an einem Holzstift befestigt und die zwei feinen Kupferzuleitungen durch leichtes Einschmelzen in den Schellackrahmen auf die beiden blanken Flächen der Platte aufgedrückt, wo sie fest verkupfert wurden. Den Schellack ließ man entweder stehen, da er als Stütze für den Graphit dienen konnte, oder man löste ihn in Alkohol auf.

Diese Präparate waren mit Zuleitungen wenig über 1 mm dick. Sie zeigten aber einen mit der Zeit allmählich ansteigenden Widerstand. Aber in einem Fall wenigstens ging das nur langsam vor sich und in allen Fällen waren die Aenderungen verhältnismäßig klein gegen die hier betrachteten Effekte. Doch muß diese Veränderlichkeit des feldfreien Widerstandes, ob sie auf mangelhaftes Haften des Kupfers an der Graphitfläche oder auf Aenderungen im Graphit selbst zurückzuführen ist, als ein Nachteil der Kupferpräparate angesehen werden. Bedenklich war auch die Unmöglichkeit bei diesen Präparaten, die Ränder der Platte genau parallel der Hauptachse zu schneiden, so daß keine Sicherheit darüber bestand, ob die elektromotorische Kraft der Hauptachse genau parallel gerichtet war oder nicht. In diesem Falle eine wichtige Bedingung. Denn bei dem sehr großen Unterschied zwischen den Leitfähigkeiten parallel bzw. senkrecht zur Achse hängt der spezifische Widerstand sehr wesentlich von der Neigung zur Achse ab.

Die Quecksilber-Zement-Präparate sollten von den Nachteilen der Kupferdrähte frei sein. Sie stellen das Ergebnis vieler Versuche dar, den Kontakt mit der Graphitplatte durch Quecksilber zu vermitteln. Für sie wie auch für die Quecksilber-Paraffin-Präparate wurde ein von der Dixon-Graphit-Co. gelieferter amerikanischer Graphit (G, VIII) ausschließlich be-

nutzt. Dieser Graphit bestand aus sehr schönen dünnen Blättern, deren Reflexionsvermögen nahezu gleich dem von poliertem Stahl war. Auch die drei ausgezeichneten Richtungen in der basischen Ebene zeigten sich sehr deutlich. Im Gegensatz zu dem Ceylongraphit waren aber häufig Stellen, oftmals gleichseitige Dreiecke oder 60—120° Parallelogramme zu finden, wo die Fläche vollkommen frei von Knicklinien und in sehr hohem Grade eben war. An desen Stellen waren oft die Spiegelbilder von Gegenständen in drei oder vier Meter Entfernung noch regelmäßig. Nach sorgfältigem Abstreifen der Spaltflächen auf beiden Seiten konnte ein bis auf einige Prozent genauer Planparallelismus konstatiert werden, auch an Regelmäßigkeit der Kristallstruktur und Festigkeit übertraf diese Sorte alle anderen, von denen etwa 15 zur Untersuchung gelangten. Wie mir von Geheimrat Liebisch des Mineralogischen Instituts der Universität versichert wurde, konnten die besten Exemplare dieser Sorte als reiner, natürlicher Graphit betrachtet werden.

Das Verfahren beim Herstellen der Quecksilber-Zement-Präparate war folgendes: Zuerst wurde eine von den erwähnten glatten Stellen aus einem rohen Stück herausgesucht. Dieses geschah oft durch Beobachten der Spiegelbilder, wobei die guten Stellen sich an der Regelmäßigkeit des Spiegelbildes erkennen ließen. Der Grad der Festigkeit diente auch als Kriterium für den Wert des Materials. Es wurden einige Kristallschichten mit einer Rasiermesserklinge abgestreift und die Festigkeit nach der Leichtigkeit, mit welcher die Schichten sich abreißen ließen, beurteilt.

War eine günstige Stelle gefunden — manchmal befanden sich mehrere auf einem und demselben rohen Stück Graphit — so wurde, nachdem die Lage der betreffenden Stellen genau notiert war, die ganze Graphitplatte in Schellack eingeschmolzen.

Dann wurden die Teile, die verwendet werden sollten, mit einer sehr feinen Laubsäge, die von einer speziell zu dem Zweck konstruierten Sägeführung geführt war, herausgeschnitten. Um einen Bruch der Platte zu verhüten, wurden die beiden ersten Sägespalten (die Platten waren alle vierseitig) mit Zement ausgefüllt, ehe die beiden anderen Seiten geschnitten wurden. Der Schellack wurde dann mit absolutem Alkohol gelöst. Auf den beiden breiten Flächen der Platte, die einen Flächeninhalt von einigen Quadratmillimetern hatten, wurden mit einer Rasiermesserklinge die Kristallschichten solange sorgfältig abgestreift, bis diese Flächen möglichst natürliche Spaltflächen waren. Die Dicke der Platten wurde zunächst mit einem Z e i ß schen Dickenmesser ausgemessen. Man bettete dann die Platte wieder in Schellack ein und schliff zwei gegenüberliegende Seiten möglichst senkrecht zur Ebene der Platte mit feinem Schmirgelpapier ab. Auf diese abgeschliffenen Seiten wurde dann ein guter zahnärztlicher Zement gedrückt; sobald der Zement fest war, wurden auch die beiden übrigbleibenden Seiten abgeschliffen. An diesem Punkt wurden die Längen von allen vier Seiten und einer Diagonale der Platte mit einem Meßmikroskop gemessen. Erst dann wurden die beiden zuletzt abgeschliffenen Seiten mit Zement belegt, jedoch auf einer von ihnen der noch weiche Zement fast bis zur Graphitplatte entfernt, um Platz für die Quecksilberzufuhrröhren zu machen. Nun wurde der Schellack in absolutem Alkohol gelöst.

Das Endresultat war demnach eine Graphitplatte mit natürlichen Spaltflächen und nahezu senkrecht geschnittenen Rändern, die sich in einem kleinen, genau passenden Zementkasten befand. Die flachen kapillären Quecksilberröhren wurden dann durch die für sie bestimmten Oeffnungen eingeführt und an den Zementkasten festgekittet. Potentialdrähte zur Bestimmung des Poten-

tialgefälles, die aus kurzen Stücken Emailledraht bestanden, wurden auf beiden Seiten bis ganz nahe[5] an die Plattenoberfläche eingeleitet und befestigt, die beiden noch offen bleibenden Seiten des Zementkastens wurden mit sorgfältig gereinigten, der Plattenfläche nahezu parallel gestellten Platinelektroden abgeschlossen und das ganze außen mit einer dünnen Schicht Zement belegt. Stärkere Zuführungsdrähte wurden an die Potentialdrähte und die Platinelektroden angelötet. Schließlich stellte man das Präparat vertikal und füllte die Quecksilberröhren mit Quecksilber, welches den ganzen Zementkasten auf beiden Seiten der Graphitplatte zwischen ihm und den Platinelektroden ausfüllte. Damit war das Präparat fertig zum Messen[6].

Theoretisch sollte diese Form des Präparats alle Bedingungen des Experiments erfüllen. Trotzdem ergaben sich manchmal ziemlich erhebliche Aenderungen des feldfreien Widerstandes. Diese waren zweifellos wenigstens zum Teil darauf zurückzuführen, daß der Zement nicht sehr gut an den glatten Rändern der Graphitplatte haftete. Auch zeigten die Oberflächen der nach diesem Verfahren präparierten Platten gewisse Verletzungen, Knicke und Falten, die anfangs vor dem Einbetten in den Schellack und dem Schleifen nicht vorhanden waren und die leicht,

---

5. Der hierdurch bedingte Fehler betrug wegen der viel größeren Leitfähigkeit des Quecksilbers im Vergleich mit dem Graphit in Richtung der Hauptachse höchstens einige Prozent.

6. Siehe S. 21, 23 die Photographien IIId u. IV. Von diesen entspricht IV genau dem äußeren Aussehen eines Quecksilber-Zement-Präparats; ebenso IIId außer darin, daß das kleine Paraffinkästchen als durch ein vollkommen ähnliches aus Zement ersetzt zu denken ist.

besonders unter dem Druck des Quecksilbers, zu Widerstandsänderungen führen könnten.

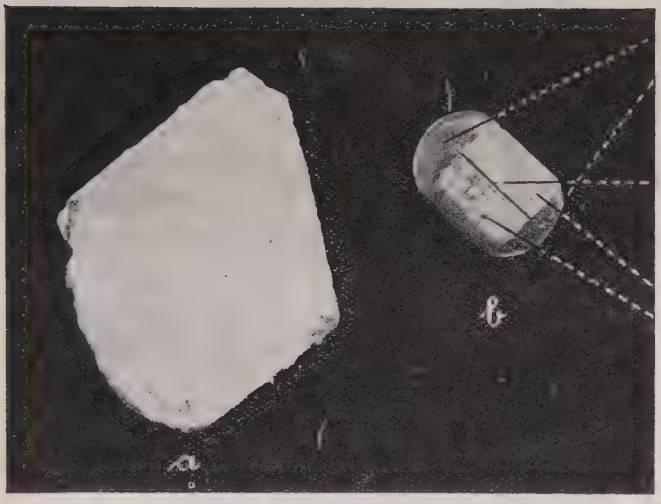
Erst durch die Quecksilber-Paraffinpräparate (s. Photograph. S. 17 ff.) wurde die Veränderlichkeit des feldfreien Widerstandes endlich in befriedigender Weise beseitigt. Da nur Schellack an der außerordentlich glatten Spaltfläche des Graphits mit Sicherheit haftete und daher als Einbettungsmittel beim Ausschneiden der Platte dienen konnte, und weil die klebrigsten organischen Materialien, wie Paraffin und Wachs, allein an den ebenfalls sehr glatten Rändern der Platte hielten, so mußte ein Verfahren gefunden werden, welches die Anwendung von beiden Materialien gestattete. Die endgültige Methode war folgende: Die Graphitstelle wurde schon in ihrer Lage im rohen Stück, ohne es auszusägen, in der beschriebenen Weise durch Abstreifen der Kristallschichten planparallel gemacht (Photographie I). Es wurde dann mit einer verdünnten alkoholischen Lösung von Schellack auf beiden Seiten leicht bestrichen und getrocknet. Die Oberfläche des Graphits wurde dadurch mit einer sehr dünnen Schicht von Schellack belegt und es ließen sich mehrere anorganische, in Wasser lösliche Kitte finden, die, obgleich sie nicht direkt an der Graphitfläche hafteten, doch sehr gut an der Schellackfläche hielten. Als bevorzugt wurde ein außerordentlich fester, aus flüssigem Leim und Gips hergestellter Kitt benutzt. Die mit Schellack dünn belegte Graphitplatte wurde in den Kitt eingebettet (Photographie IIa) und ausgesägt, nicht geschliffen, wie bei den Quecksilber-Zement-Präparaten; denn das Schleifen war zum Teil für die erwähnte Verletzung der Graphitfläche verantwortlich. Hierbei wurde als Bindematerial in den durch das Sägen entstehenden Spalten (der Kittblock wurde niemals ganz durchgeschnitten) Paraffin (60 %) statt Zement verwendet, welches durch Erwärmung des ganzen

bis ein wenig über dem Schmelzpunkt in die Spalten eingeschmolzen wurde. Waren alle vier Seiten geschnitten, so erhielt man durch Schmelzen der Paraffinfüllung und Abbrechen des überflüssigen Kitts einen kleinen in der Mitte durch die Graphitplatte in zwei Teilen eingeteilten Kittblock. Während die beiden Hälften des Blockes stets mit Paraffin fest gebunden waren, wurden die Ränder der Graphitplatte leicht nachgeschliffen, um die kleinen, von der Säge hinterlassenen Unebenheiten zu entfernen. Sie erschienen dann als ein scharf begrenzter, um die ganze mittlere Peripherie des Kittblocks herumlaufender schwarzer Streifen (Photographie IIb). Die Bestimmung der Dicke der Platte war im rohen Stück ohne Aussägen unmöglich. Sie konnte aber an dieser Stelle durch Messung an den bloßgelegten Rändern der Platte mit einem stark vergrößernden Meßmikroskop bestimmt werden. Nun konnten die Seitenflächen des Kittblocks und damit die Ränder der Graphitplatte durch Eintauchen des ganzen in das geschmolzene Medium mit Paraffin belegt werden (Photographie IIIc), ohne Gefahr, daß dieses zwischen dem Kitt und der Graphitplatte eindringen würde. Der Kitt wurde dann mit Wasser gelöst und die dünne Schellackschicht durch Behandlung mit Kalilauge entfernt. Dabei blieb das Paraffin unberührt. Schließlich hatte man also eine vorschriftsmäßige Graphitplatte, die mittten in einem genau passenden, dem Zementkasten der Quecksilber-Zement-Präparate ähnlichen Paraffinkasten fest saß (Photographien IIId, IV). In dieser Weise wurden Präparate hergestellt, 27 von den Quecksilber-Paraffin-Präparaten z. B., bei denen die Graphitplatte schließlich ebenso tadellos wie anfangs erschien, und welche, obgleich diese Präparate zuerst Aenderungen im Widerstand zeigten, nach etwa einem Tage genügend konstant wurden.

I.

Die rohe Graphitplatte.
Besonders zu bemerken sind die feinen Oberflächenlinien, die 60° bzw. 120° zu einander geneigt und als Zeichen einer gut orientierten, aber später etwas verletzten Struktur anzusehen sind.

II.



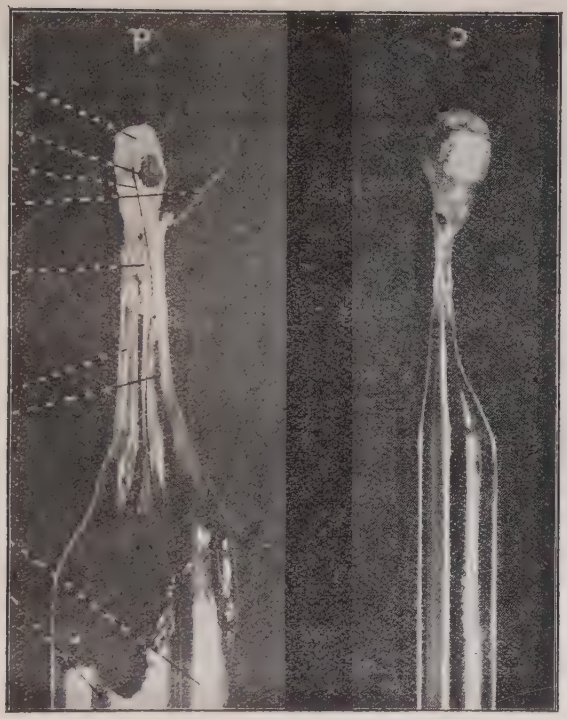
Paraffin-Bindungen. Nacher-Wände des Quecksilbergefäßes.

Rand der Graphitplatte.

Die beiden Hälften des Kittblocks.

Die rohe Platte wird an einer ausgesuchten Stelle durch Abstreifen der Kristallschichten planparallel gemacht, mit Schellack leicht bestrichen und in Kitt eingebettet (a). Die betreffende Stelle wird dann ausgesägt, wobei die oberen und unteren Hälften des Kittblockes stets mit Paraffin fest zusammengehalten werden. Die Ränder der Graphitplatte werden nachträglich leicht geschliffen und sämtliche Dimensionen der Platte einschließlich der Dicke mit einem Meßmikroskop bestimmt (b).

III.



Quecksilber

Zufuhrröhre

Zementbindung.

Platinelektrode fertig zum Herunterklappen

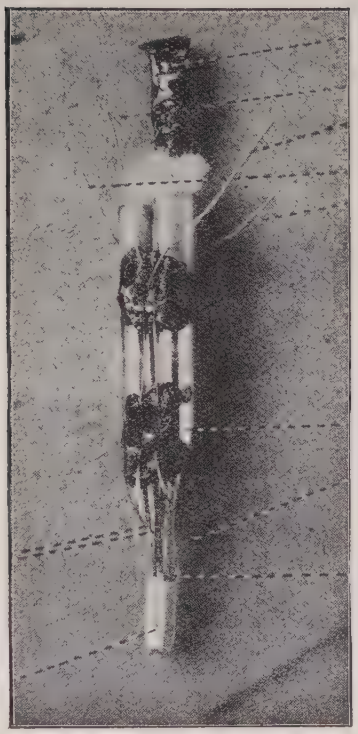
Emaille-Potentialdraht.

Graphitplatte.

Paraffingehäuse

Alle vier Seiten von b werden mit Paraffin belegt durch sorgfältiges Eintauchen des Ganzen in das geschmolzene Medium. Das Präparat wird nun am Ende einer Glasstange befestigt (c) und der Kitt durch Wasser, die dünne Schellackschicht durch Kalilauge gelöst. So erhält man ein kleines Paraffinkästchen (d), mitten in welchem die Graphitplatte fest sitzt und dessen beide so getrennten Hälften im fertigen Präparat als Quecksilbergefäße dienen. Nach Abtrennen des Kästchens von der Glasstange wird es an die beiden Quecksilberröhren gekittet, die durch Oeffnungen in den Endwänden eingeführt werden. Alsdann werden die Emaille-Potentialdrähte durch eine Seitenwand dicht an der Fläche der Graphitplatte und die Platinelektroden als abschließende Deckel für die beiden Quecksilbergefäße angebracht (d).

IV.



Die Quecksilbergefäße werden schließlich außen mit Zement dünn belegt. Stärkere Zuleitungen werden an die Potentialdrähte und Platinelektroden angelötet. Dann wird das Präparat vertikal gestellt und die Quecksilberröhren gefüllt. Damit ist das Präparat fertig zum Messen.

Die Meßmethode.

Die Meßmethode war bei allen drei Sorten von Präparaten die nämliche. Die Widerstände wurden mit einer Thomsonschen Widerstandsbrücke (Siemens-Halskesches Modell) gemessen. Der Hauptmeßstrom betrug gewöhnlich 50 bis 100 Milliampere; doch wurde niemals eine Abhängigkeit des Widerstandes von der Stromstärke beobachtet. Bei jeder Messung wurden das Galvanometer und die Batterie kommutiert und der Mittelwert der vier Ablesungen genommen. Der benutzte Halbringmagnet gab Felder bis zu 30 Kilogauß bei einem Strom von 40 Ampere. Die Stirnflächen der Polspitzen hatten 12 mm Durchmesser und befanden sich in 4,6 mm Abstand voneinander. Innerhalb des vom Präparate eingenommenen Raumes von höchstens 2,5 mm Ausdehnung war das Feld genügend gleichförmig, wie ich mich überzeugte. Untersucht wurden 5 Kupfer-, 6 Quecksilber-Zement-, und 4 Quecksilber-Paraffin-Präparate. Von diesen sind die Quecksilber-Paraffin-Präparate zweifellos die besten, und unter diesen wieder die Präparate 27 und 28. Gegen das Präparat 27 läßt sich kaum etwas einwenden[1]. Die Graphitplatte bei diesem Präparat war nach dem Präparieren noch vollkommen glatt und gab auf beiden Seiten regelmäßige Spiegelbilder von entfernten Gegenständen. Meiner Ansicht nach gelten die mit diesem Präparat erhaltenen Werte sehr nahe für natürlichen ungestörten Graphit. Präparat Nr. 28 war ein wenig schlechter, litt nur beim Präparieren. Nr. 28 und 30 hatten aber ziemlich erhebliche Verletzungen und bei 29 war auch der Gra-

1. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß nach einer Privatmitteilung des Herrn Dr. Ewald in München einige von meinen Graphitplatten, die ich nach Abschluß der Untersuchung dorthingeschickt hatte, mit Röntgenstrahlen gute Interferenzdiagramme lieferten, also von ziemlich vollkommener Struktur sein mußten.

	Signatur	Quer-schnitt qmm	Dicke mm	R OHM	K ($\times 10^2$) OHM pro ccm	$\frac{R'-R}{R}$ (Long) $\mathfrak{H}$=26 KGSS	$\frac{R'-R}{R}$ (Long) $\mathfrak{H}$=28 KGSS	$\frac{R'-R}{R}$ (Transv.) $\mathfrak{H}$=26 KGSS
Hg = Paraffin-Präparate.	GVIII, 27	5,72	0,155	0,00234	0,864	0,680	0,740	
	„ 28	3,62	0,127	0,00280	0,798	0,834	0,902	0,115
GVIII = Amerikan.	„ 29	4,16	0,144	0,00478	1,38	1,46	1,65	
Graphit (Dixon Co.)	„ 30	3,50	0,194	0,0099	1,79	2,10	2,32	
Hg = Zement-Präparate.	„ 21	6,69	0,180	0,00642	2,38		1,42	
	„ 22	4,18	0,169	0,00804	1,99		1,38	
	„ 23	2,42	0,129	0,00993	1,86		1,99	
	„ 24	3,74	0,111	0,00883	2,98		2,05	
	„ 25	4,83	0,100	0,00184	0,889		0,670	
	„ 26	5,02	0,135	0,00337	0,125		1,06	
Kupfer-Präparate	GI 16	0,94	0,80	0,09836	0,98			0,16
GI = Ceylon-Graphit (Merck)	„ 17	1,63	0,55	0,0308	0,91			0,11
	„ 18			0,519		1,06		0,30
GVII = Mexikan. Graphit.	„ 19	1,21	0,22	0.0248	1,36	0,84		0,22
	GVII 20	0,84	0,18	0,0206	0,96			

phit von schlechter Qualität. Im Gegensatz zu den Quecksilber-Paraffin-Präparaten sind die Kupfer- und Quecksilber-Zement-Präparate wegen der bei ihnen fast ausnahmslos beobachteten Veränderlichkeit des feldfreien Widerstandes bedeutend weniger zuverlässig.

Der spezifische Widerstand.

Die Resultate für den absoluten spezifischen Widerstand sind in Tabelle I, Spalte 5, zusammengestellt, die Werte für die Quecksilber-Paraffin-Präparate wegen ihrer größeren Zuverlässigkeit zuerst. Die mittels der besten Präparate 27 und 28 bestimmten geringsten Werte stimmen in genügender Weise miteinander überein, sowie auch mit den Resultaten für die Präparate 25 und 26, die einzigen unter allen Zement-Präparaten, welche einen nahezu konstanten feldfreien Widerstand zeigten. Merkwürdigerweise liegen die Werte für die Kupferpräparate auch sehr nahe zusammen. Wenn wir die Werte für die Präparate 27 und 28 als nahezu richtig annehmen, so würden wir auf den Wert

$$0{,}8 — 0{,}9 \times 10^{-2} \text{ Ohm pro ccm}$$

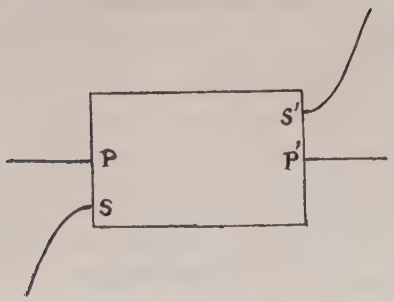
für den absoluten spezifischen Widerstand des Graphitkristalls parallel der Hauptachse schließen. Der mittlere Wert aller Messungen war $1{,}44 \times 10^{-2}$ Ohm pro ccm. Nun liegen zahlreiche Messungen für den spezifischen Widerstand des Graphits senkrecht zur Hauptachse vor, die sämtlich von der Größenordnung 10^{-4} sind. Ich habe aber der Sicherheit wegen für dasselbe Material, das ich zur Bestimmung des spezifischen Widerstandes parallel der Achse benutzte, auch den spezifischen

Widerstand für die Richtung senkrecht zur Achse bestimmt. Es ergaben sich aus zwei Messungen die Werte:

$$0{,}80 \times 10^{-4} \text{ Ohm pro ccm.}$$
$$0{,}56 \times 10^{-4} \text{ Ohm pro ccm.}$$

Soviel mir bekannt, ist niemals ein so hoher Leitfähigkeitsunterschied für eine und dieselbe Substanz konstatiert worden. Es ist interessant, zu bemerken, daß der spezifische Widerstand des Graphitkonglomerats größer erscheint als der für die Richtung senkrecht zur Hauptachse. Dieses ist aber nach dem Vorhergehenden zu erwarten, denn beim Konglomerat kommt auch die Richtung parallel der Hauptachse mit dem hohen spezifischen Widerstand in Betracht.

Der große Unterschied zwischen den Leitfähigkeiten parallel und senkrecht zur Achse tritt auch bei einer Hallplatte ähnlich wie die am Anfang beschriebene, in Erscheinung. Wie erinnerlich, ist die Platte (rechtwinklig) in der Weise geschnitten, daß die Hauptachse in ihrer Ebene liegt, und zwar senkrecht auf der Längsdimension steht (Fig. 1). Demnach hat die Platte nach zwei ihren beiden Dimensionen parallelen Richtungen sehr verschiedene Leitfähigkeiten. Sind nun die primären Elektroden etwas unsymmetrisch angebracht oder ist die Platte nicht ganz symmetrisch geschnitten, so hat das offenbar wegen des großen Leitfähigkeitsunterschiedes eine sehr starke Verzerrung der Stromlinien zur Folge. Es kann also vorkommen, daß die sekundären Elektroden bei Gleichgewicht nicht mehr symmetrisch gelegen sind wie im gewöhnlichen Fall, sondern sie finden sich etwa an gegenüberliegenden Ecken der Platte oder wandern selbst um die Ecken herum (Fig. 2). (Diesen Fall habe ich beobachtet.) Das zeigt, daß der große spezifische Widerstand parallel der



Hauptachse beim Graphit kein Oberflächeneffekt ist, sondern daß er eine wirkliche Existenz in der Substanz selbst hat. Dieses wird auch durch die Uebereinstimmung der Resultate, die mit verschiedenartigen Präparaten, wie den Kupfer- und Quecksilberpräparaten, gewonnen sind, noch bestätigt. Auch ist hervorzuheben, daß die Resultate teils mit Ceylon- und mexikanischem, teils mit amerikanischem Graphit erhalten wurden. Da aber die Resultate für den spezifischen Widerstand parallel der Achse annähernd stimmen, so scheint der große Leitfähigkeitsunterschied eine gemeinsame Eigenschaft dieser Sorten zu sein.

Man könnte meinen, daß die spezifischen Widerstände für die Richtungen senkrecht zu den Spaltebenen und parallel zu diesen in Wirklichkeit gleich sind, und daß nur infolge schlechten Kontaktes zwischen den Kristallschichten der erstere scheinbar größer ist.

Daß es Stellen gibt, wo der Kontakt zwischen den Schichten weniger gut ist als an anderen, ist zweifellos richtig. Auch die besten Platten zeigen z. B. unregelmäßige Spiegelbilder, wenn man den Gegenstand nur genügend weit entfernt, ein Zeichen, daß auch hier gewisse kleine Unebenheiten vorhanden sind. Auch beim Abstreifen der Schichten merkt man, daß manche Schichten

oder Teile von Schichten sich leichter abreißen lassen, als andere. Es ist also sicher ein gewisser Kontaktwiderstand vorhanden in der Richtung parallel der Achse.

Daß dieser aber nicht der Haupteffekt ist, halte ich durch die erzielte Uebereinstimmung der Resultate für den spezifischen Widerstand für genügend bewiesen. Beruhte nämlich der Widerstand nur auf schlechtem Kontakt, so würde man allerlei Werte für den spezifischen Widerstand bekommen; denn unregelmäßige Ursachen, wie Spalten und Risse, könnten, auch wenn sie sehr klein wären, unmöglich zu bestimmten Resultaten führen. Die Werte für den spezifischen Widerstand liegen aber zwischen den verhältnismäßig engen Grenzen $0{,}8 \times 10^{-2}$ und 3×10^{-2} Ohm pro Kubikzentimeter, oder wenn man die zuverlässigeren absondert, zwischen noch engeren Grenzen, und sind sämtlich von einer ganz anderen Größenordnung, als die beiden Zahlen für die Richtung senkrecht zur Achse. Wir müssen also daraus schließen, daß der unregelmäßige Kontaktwiderstand in Richtung der Achse zum Teil für die Abweichungen in den Werten des spezifischen Widerstandes für verschiedene Präparate verantwortlich ist, die Größenordnung des spezifischen Widerstandes aber nicht erklären kann.

Führt man nun die Abweichungen in den Werten des spezifischen Widerstandes für verschiedene Präparate auf die Spalten zwischen den Kristallschichten des Graphits zurück, so kann man sie umgekehrt benutzen, um die Qualität des Graphits roh zu schätzen. Demnach ist das Material um so mehr gespalten, d. h. um so „schlechter", je größer der Wert des spezifischen Widerstandes infolge des durch die Spalten bedingten Kontaktwiderstandes ist. Aus den Werten des spezifischen Widerstandes für die Quecksilber-Paraffin-Präparate,

Präparat	k (Ohm pro ccm)
27	$0{,}864 \times 10^{-2}$
28	0,798 „
29	1,38 „
30	1,79 „

würde man also schließen, daß von diesen Präparaten die Präparate 27 und 28 den „besten", 29 „schlechteren" und 30 den „schlechtesten" Graphit enthalten. Aus der geringeren Differenz zwischen den Werten für 27 und 28 kann man kaum einen Schluß ziehen. Diese Gruppierung stimmt mit der nach dem Aussehen der Graphitplatten schon getroffenen überein und wird später als Grundlage für gewisse Betrachtungen über die Effekte im Magnetfeld dienen.

Messungen im Magnetfeld*).

a) Orientierungsversuche.

Was den Einfluß der Magnetisierung auf den Widerstand parallel zur Hauptachse anbelangt, so wurden mit den ersten Kupferpräparaten Versuche in dieser Richtung angestellt.

Zuerst war das Präparat im Felde so orientiert, daß die Hauptachse und der Strom senkrecht zum Feld gerichtet waren ($\mathfrak{J}$, $\mathfrak{A} \perp \mathfrak{H}$). Dann wurde es aus dieser Lage durch eine Drehung von 90° in die Lage gebracht, in welcher der Strom und die Achse beide parallel dem Feld waren ($\mathfrak{J} \parallel \mathfrak{A} \parallel \mathfrak{H}$). Dabei sollte,

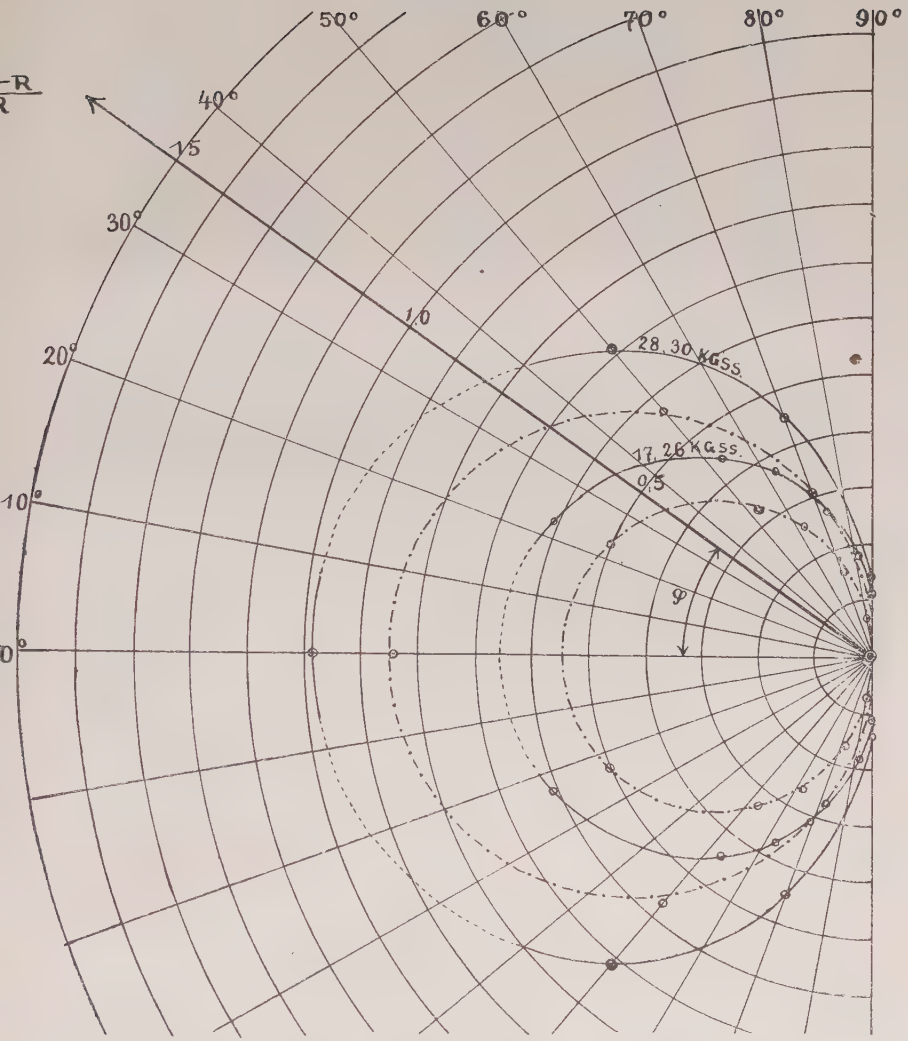
---

* Notiz über die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes parallel der Achse: Zwischen dem Schmelzpunkt des Paraffins und dem Gefrierpunkt des Quecksilbers blieb der Widerstand parallel der Hauptachse von $+40°$ C. bis $-25°$ C. merklich konstant. Von $-25°$ C. bis $-35°$ C. nahm er stark ab. Diesen Verlauf hat Roberts (l. c. S. 471) auch für die transversale Richtung gefunden.

so würde man meinen, die Widerstandsänderung bei abnehmendem Winkel zwischen Strom und Feld allmählich abnehmen und bei Parallelismus von Strom und Feld entweder verschwinden oder vielleicht wenigstens ein Minimum zeigen. Die Messungen mit den Kupferpräparaten zeigten aber in sehr überraschender Weise — und das Ergebnis ist seitdem in allen Fällen ohne Ausnahme bestätigt worden —, daß die Widerstandsänderung im Feld bei abnehmendem Winkel zwischen Strom- und Feldrichtung statt zu verschwinden oder auch abzunehmen, vielmehr zunimmt und in der Stellung, wo der Strom der Feldrichtung parallel fließt, ihren Maximalwert hat.

Graphisch tritt dieses sehr deutlich hervor. Es sind in Fig. III S. 33 zwei Polarkurven abgebildet, die mit dem Kupferpräparat 17 bei 26 Kilogauß und dem Quecksilber-Paraffin-Präparat 28 bei 30 Kilogauß erhalten wurden. Dabei bedeutet die Winkelkoordinate (φ) den spitzen Winkel zwischen Strom- und Feldrichtung, der Radiusvektor den entsprechenden Wert von $\frac{(R'-R)}{R}$. Aus diesen Kurven selbst ist keine einfache Beziehung zwischen $\frac{(R'-R)}{R}$ und φ zu ersehen. Verkürzt man aber jeden Radiusvektor um den Betrag von $\frac{(R'-R)}{R}$ für $\varphi = 90^0$, so erhält man in beiden Fällen, wie die punktierten Kurven (Kreise, Fig. 3) zeigen, nahezu Kreise, d. h. die Differenz zwischen dem Wert von $\frac{(R'-R)}{R}$ für irgend einen Winkel φ und seinem Wert für $\varphi = 90^0$ ist nahezu proportional cos φ. Diese Beziehung wird auch durch die numerischen Werte bestätigt. Für das Kupferpräparat 17 bei 26 Kilogauß (in Fig. 3 aufgezeichnet) z. B. sind die Zahlen folgende:

Fig. III.



φ = spitzer Winkel zwischen Strom- und Feldrichtung.
Die gestrichelten Teile der Kurven sind willkürlich, weil es unmöglich war, Punkte für sie zu bestimmen. Die Kurven ergänzen sich aber, indem der 0°-Punkt, welcher bei einer fehlt, bei der anderen vorhanden ist.

Tabelle II.

φ	$\frac{(R'-R)}{R}$	$\left(\frac{R'-R}{R}\right)_\varphi - \left(\frac{R'-R}{R}\right)_{90^0} = \Delta$	$\cos\varphi$	$\frac{\cos\varphi}{\Delta}$
23 °	0,61	0,50	0,92	1,8⁴
53 °	0,44	0,33	0,60	1,8²
63 °	0,37	0,26	0,45	1,7³
73 °	0,27	0,16	0,29	1,8¹
83 °	0,18	0,07	0,12	1,7¹
90 °	0,11	0	0	—

Wenn man nun bedenkt, daß die Winkelmessung wegen der Kleinheit und Unsichtbarkeit der Graphitplatte hier sehr ungenau ist — den 90 °-Punkt mußte man durch Rückschluß aus dem Minimum der Widerstandsänderung bestimmen —, so sieht man, daß die Uebereinstimmung mit der Cosinus-Funktion befriedigend ist. Die durchschnittliche Abweichung der Werte für $\frac{\cos\varphi}{\Delta}$ von ihrem Mittelwert ist nur 3 %, obgleich, angenommen, daß bei der Genauigkeit der Widerstandsmessung Δ fehlerfrei ist, der Fehler in $\cos\varphi$ und also in $\frac{\cos\varphi}{\Delta}$ für 1 ° Fehler in φ bei 50 ° etwa 2 %, bei 70 ° 5 % betragen würde. Für das Präparat 28 erhalten wir weiter bei 16 Kilogauß (nicht in Fig. 3 gezeichnet):

Tabelle III.

φ	$\frac{R'-R}{R}$	Δ	$\cos\varphi$	$\frac{\cos\varphi}{\Delta}$
0 °	0,456	0,399	1	2,50
50 °	0,346	0,283	0,643	2,27
70 °	0,195	0,138	0,342	2,48
90 °	0,057	0	0	—

Hier ist die mittlere Abweichung bei $\frac{\cos \varphi}{\Delta}$ wieder etwa 3 %. Für dasselbe Präparat bei 30 Kilogauß (Fig. 3) ist die Uebereinstimmung auch etwa die nämliche:

Tabelle IV.

φ	$\frac{R'-R}{R}$	Δ	$\cos \varphi$	$\frac{\cos \varphi}{\Delta}$
0 °	0,986	0,846	1,0	1,18
50 °	0,712	0,572	0,643	1,12
70 °	0,448	0,308	0,342	1,11
90 °	0,140	0	0	—

Einige weniger zuverlässige Präparate, wie z. B. 29, deren Feldkurven auch von den Kurven für die besten Quecksilberpräparate 27 und 28 abwichen, gaben eine Kurve, die von dem Typus in Fig. 3 etwas verschieden war, mit einem Wendepunkt in der Nähe von $\varphi = 90°$. Von den Präparaten 28 und 17 können wir aber behaupten, daß bei ihnen innerhalb der Genauigkeit der Messungen die relative Widerstandsänderung für irgendeinen Winkel, φ, zwischen den Strom- und Feldrichtungen, gleich der relativen Aenderung für $\varphi = 90°$ ist, vermehrt um ein Glied, welches cos φ proportional ist. Dieses wird mathematisch ausgedrückt durch die Gleichung,

$$\frac{R'-R}{R} = \left(\frac{R'-R}{R}\right)_{90°} + b \cos \varphi$$

wo b ein konstanter Proportionalitätsfaktor ist, oder da $\left(\frac{R-R'}{R}\right)_{90_0}$ eine Konstante a ist, welche unabhängig von φ ist, durch die Gleichung,

$$\frac{R'-R}{R} = a + b \cos \varphi$$

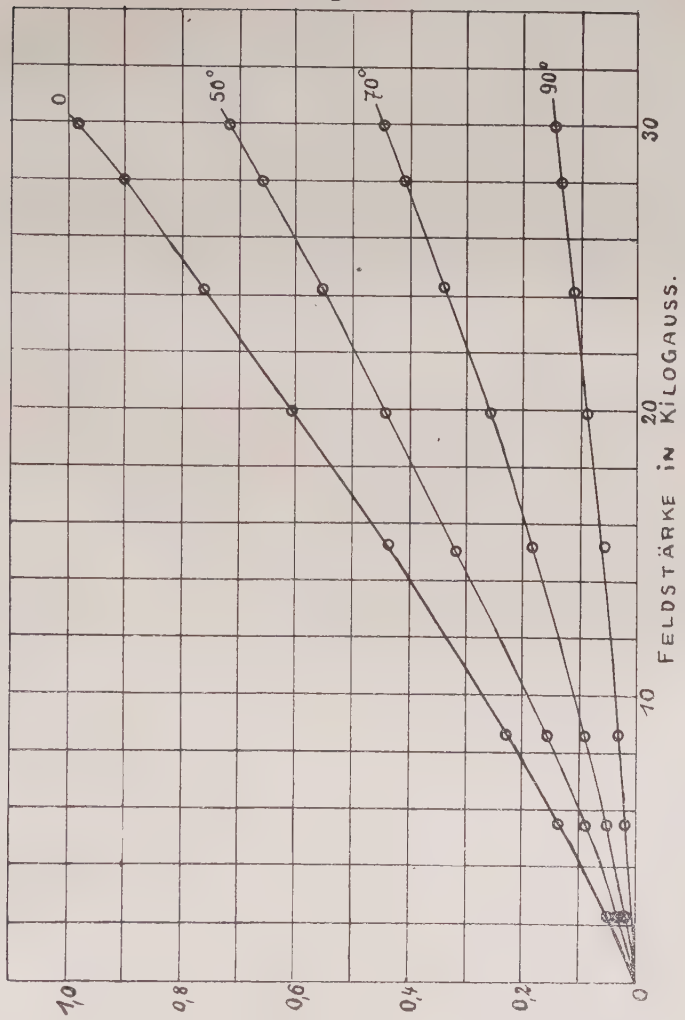
Dies ist eine überaus einfache Beziehung im Vergleich mit denjenigen, die man im allgemeinen zur Darstellung der meisten Orientierungserscheinungen aufstellen muß. Nun ist die Komponente des Feldes parallel der Hauptachse proportional cos φ. Wir können also sagen, die Widerstandsänderung für irgend eine Orientierung des Kristalls ist gleich der Widerstandsänderung, wenn die Hauptachse senkrecht zum Felde steht, vermehrt um ein Glied, welches der magnetischen Feldkomponente parallel der Hauptachse in der betreffenden Orientierung proportional ist.

Man kann auch Kurven gleicher Orientierung und veränderlichen Feldes bestimmen. Solche Kurven für das Quecksilberpräparat 28 und für die Neigungswinkel 0 °, 50 °, 70 °, 90 °, sind beigefügt (Fig. IV S. 37). In bezug auf diese Kurve sagt die oben abgeleitete Beziehung aus, daß bei gegebenem Feld die Differenzen zwischen den Ordinaten für die verschiedenen Kurven und der Ordinate für die unterste Kurve proportional dem Cosinus der entsprechenden Neigungswinkel sind.

Tabelle V (Fig. IV zugehörig).

	$\frac{R'-R}{R}$			
$\mathfrak{H}$	0 °	50 °	70 °	90 °
29,98	0,986	0,712	0,448	0,140
28,04	0,902	0,657	0,411	0,132
24,21	0,762	0,553	0,342	0,112
19,94	0,608	0,443	0,257	0,087
15,29	0,436	0,319	0,187	0,053
8,64	0,230	0,158	0,088	0,030
5,52	0,138	0,083	0,052	0,020
2,29	0,047	0,030	0,018	—

Fig. IV.



Präparat 28.

Feldkurven bei verschiedenen Neigungen der Hauptachse (Strom) zur Feldrichtung.

b) Der longitudinale maximale Effekt.

Wie man aus den Orientierungskurven (Fig. III S. 33) sieht, besitzt die relative Widerstandsänderung ein Maximum für $\varphi = 0°$, und, da in dieser Lage der Strom parallel dem Felde ist, so handelt es sich um einen rein longitudinalen Effekt. In der Tabelle I, Spalten 6 und 7, findet man die Werte für diesen longitudinalen Effekt für die Kupferpräparate bei 26 Kilogauß, für die anderen bei 28 Kilogauß. Man sieht, der Effekt ist für einen longitudinalen Effekt sehr stark, bei dem Quecksilberpräparat 27 in einem Feld von 30 Kilogauß über 80 %. Dieses dürfte wohl der größte, wenigstens bei festen Körpern beobachtete, Longitudinaleffekt sein.

Hier könnte man auch wieder ebenso wie bei dem spezifischen Widerstand den Effekt auf Unregelmäßigkeiten im Material zurückführen; denn wäre z. B. im Graphit ein Spalt vorhanden, so müßte der Strom herumfließen. Er würde also nicht mehr parallel dem Felde, sondern zum Teil quer dazu fließen. Der Effekt wäre also kein wahrer longitudinaler, sondern nur ein scheinbar longitudinaler.

Daß nämlich auch ein transversaler Effekt vorhanden ist, kann nicht bezweifelt werden. Es ist jedoch unmöglich, daß er den ganzen oder den Hauptteil des beobachteten longitudinalen Effektes ausmacht; denn in diesem Fall würden z. B. die Kurven für die Abhängigkeit der relativen Widerstandsänderung von der Feldintensität für den longitudinalen Effekt die gleiche Gestalt haben, wie diejenigen für den transversalen Effekt. Tatsächlich aber haben sie, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, eine andere Form als die Kurven für den transversalen Effekt. Ferner ist, wie bei dem spezifischen Widerstand, die Uebereinstimmung der Resultate für den longitudinalen Effekt eine bessere, als zu

erwarten wäre, wenn der Effekt von völlig unregelmäßigen Ursachen herrührte.

Führt man die Abweichungen in den Werten des Effektes auf die Spalten im Graphit zurück, so kann man sie ebenso wie beim spezifischen Widerstand benutzen, um eine rohe Schätzung der „Qualität“ des Graphits zu erhalten. Je größer der longitudinale Effekt infolge des durch die Spalten hervorgerufenen scheinbaren longitudinalen Effektes ist, desto „schlechter“ ist der Graphit. Nach den Werten des longitudinalen Effektes für die Quecksilber-Paraffin-Präparate also

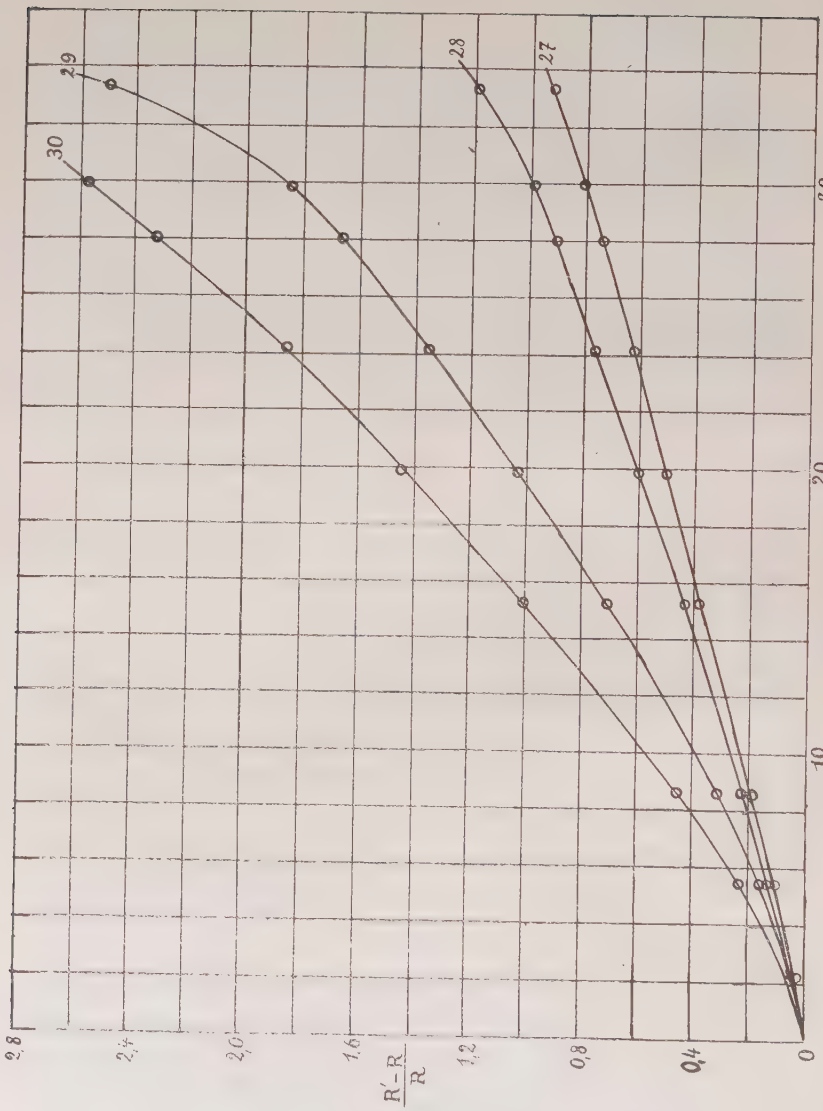
Präparat	$\frac{R'-R}{R}$ ($\mathfrak{H} = 28$ Kgss.)
27	0,74
28	0,91
29	1,66
30	2,24

sind unter diesen 27 und 28 die „besten“, 29 der „nächstbeste“ und 30 der „schlechteste“. Diese Reihenfolge ist dieselbe, wie wir schon durch die direkte Beurteilung des Graphits und aus den Werten des spezifischen Widerstandes parallel der Achse erhalten haben. Sie stellt sehr wahrscheinlich die relative Zuverlässigkeit der Quecksilber-Paraffin-Präparate dar und wird im nächsten Abschnitt die Grundlage gewisser Betrachtungen über die Effekte im Magnetfeld bilden.

c) Abhängigkeit des longitudinalen maximalen Effektes von der Feldstärke.

Was die Abhängigkeit des longitudinalen maximalen Effektes von der Feldstärke anbelangt, so wird diese in Fig. V S. 40 für die vier Quecksilber-Paraffin-Präparate dargestellt. Die

Fig. V.



HG-Paraffin-Präparate.
Feldkurven für den longitudinalen maximalen Effekt.

Tabelle VI (Fig. V zugehörig). $\frac{R'-R}{R}$

ℌ	27	28	29	30
33,40	0,920	1,185	2,500	—
29,98	0,810	0,986	1,843	2,575
28,04	0,740	0,902	1,653	2,323
24,21	0,626	0,762	1,350	1,857
19,94	0,510	0,608	1,030	1,445
15,29	0,382	0,436	0,704	1,002
8,64	0,191	0,230	0,315	0,456
5,52	0,110	0,138	0,163	0,230
2,29	0,034	0,047	0,040	—

unterste Kurve gilt für das Präparat 27, die nächste für 28, die folgende für 29 und die oberste für 30. Wie man sieht, haben diese Kurven außer der obersten eine Form, welche von der Form der Kurven für den transversalen Effekt bei derselben Orientierung des Kristalles im Felde sehr verschieden ist. Diese lassen sich nämlich durch eine Potenzfunktion darstellen[7]. Nur die oberste Kurve, die mit dem „schlechtesten" Präparat 30 — die Gruppierung der vorhergehenden Abschnitte zugrunde legend — erhalten wurde, folgt nahezu einem Potenzgesetz, jedoch nicht mit der Potenz 1,7, wie beim transversalen Effekt, sondern mit der Potenz 1,4.

Ferner ändern beim Uebergang vom „schlechtesten" zu den „besten" Präparaten die Kurven ihre Gestalt in sehr merkwürdiger Weise. Die Potenzkurve (30) dreht sich um den Koordinatenanfangspunkt herum, nur bleibt das obere Ende etwas zurück, wodurch die Kurve an diesem Ende sehr steil wird (29). Bei den „besten" Präparaten 27 und 28 aber hat dieser

7. D. E. Roberts l. c. S. 463—464.

Teil sich verkürzt und auch gedreht, so daß er bis zu den äußersten erreichbaren Feldstärken viel mehr dieselbe Richtung hat wie der mittlere Teil der Kurve. Merkwürdiger noch ist die Aenderung, die sich bei den mittleren Feldstärken vollzogen hat. Hier ist die Kurve über einem großen Intervall geradlinig geworden. Wenigstens läßt sich bei den Kurven für 27 und 28 im betreffenden Gebiet keine Krümmung nachweisen. Die unteren Kurven in ihren verschiedenen Einzelheiten — Krümmung am unteren Ende, geradliniger Teil und Krümmung am oberen Ende — erinnern sehr an die B-H-Kurven für Eisen. Ferner machen sie den Eindruck, als ob sie sich im Sinne des „guten" Graphits einer Form annähern wollten, die nach der ersten Krümmung bei den kleinen Feldern geradlinig verlaufen würde. Diese Form wäre natürlich nur bei einem vollkommen ungestörten natürlichen Graphit zu finden, und ist also, wenn sie existiert, praktisch unrealisierbar. Im Sinne des „schlechten" Graphits auf der anderen Seite ist die Grenze scheinbar eine Potenzkurve, die ihrer Form nach wenigstens den Kurven für den transversalen Effekt ($\mathfrak{J} \perp \mathfrak{A} \parallel \mathfrak{H}$) entsprechen würde.

Es ist noch zu bemerken, daß der Kristall für den hier betrachteten longitudinalen Effekt und für den großen von Roberts untersuchten transversalen Effekt, in bezug auf das Feld, genau dieselbe Lage hat. Ruft das Feld also irdgendeine Aenderung im Kristall hervor, so muß diese in beiden Fällen dieselbe sein. Demnach sind der große transversale Effekt und der von mir gefundene starke longitudinale Effekt auf denselben Zustand im Kristall zurückzuführen. Man kann also sagen, daß hier nicht die Stromrichtung im Kristall, sondern vielmehr die Lage des Kristalls in bezug auf das Feld, namentlich die Neigung der Hauptachse zum Felde, maßgebend ist.

Auch ist, wie endlich noch bemerkt werden möge, die Richtung, in welcher der longitudinale Effekt von mir beobachtet wurde, dieselbe, in welcher der Graphit nach Owen (l. c.) seine größte diamagnetische Susceptibilität besitzt, die auch, wie gesagt, die größte überhaupt beobachtete ist. Zweifellos hängen die beiden Erscheinungen zusammen.

Zusammenfassung der Resultate.

1. Es gelang Präparate von Graphit herzustellen, in welchen der Strom parallel zur Hauptachse fließt.

2. Der absolute spezifische Widerstand des Graphits in Richtung der Hauptsache wurde bestimmt. Dieser ist von der Größenordnung

$$10^{-2} \text{ Ohm pro ccm,}$$

sein wahrscheinlichster Wert ist

$$0{,}8—0{,}9 \times 10^{-2} \text{ Ohm pro ccm,}$$

der Mittelwert aller Messungen beträgt

$$1{,}44 \times 10^{-2} \text{ Ohm pro ccm}$$

3. Da der spezifische Widerstand senkrecht zur Hauptachse

$$0{,}6 \times 10^{-2} \text{ Ohm pro ccm}$$

beträgt, so hat man für das Verhältnis der beiden zirka 10^2. Dies ist, soviel mir bekannt, der größte bisher beobachtete Leitfähigkeitsunterschied bei ein und derselben Substanz.

4. Die Aenderung des Widerstandes parallel der Hauptachse im Magnetfelde wurde für verschiedene Orientierungen des Kristalls im Felde und verschiedene Feldstärken untersucht.

5. Bei einigen Präparaten ließ sich die relative Widerstandsänderung für den Neigungswinkel φ zwischen Strom (Hauptachse) und Feldrichtung innerhalb des Versuchsfehlers durch die einfache Formel ausdrücken:

$$\frac{R'-R}{R} = a + b \cos \varphi,$$

wo offenbar $a = \left(\frac{R'-R}{R}\right)_{\varphi = 90^0}$ ist.

Das heißt: Die relative Widerstandsänderung bei irgend einer Orientierung ist gleich der Widerstandsänderung, wenn die Hauptachse senkrecht zur Feldrichtung steht, vermehrt um ein Glied, welches der magnetischen Feldkomponente in Richtung der Achse in der betreffenden Orientierung proportional ist.

6. Hierbei ergab sich der merkwürdige Fall, daß die Widerstandsänderung in derjenigen Orientierung, bei welcher der Strom parallel dem Felde lief, um ein Beträchtliches (6—7 mal) größer war als bei einem senkrecht zum Felde gerichteten Verlauf des Stromes. Der longitudinale maximale Effekt (etwa 80% in einem Felde von 30 Kilogauß) ist, so viel bekannt, die größte beobachtete longitudinale Widerstandsänderung im Magnetfeld.

7. Die Abhängigkeit des longitudinalen maximalen Effektes von der Feldstärke wurde untersucht. Bei denjenigen Präparaten, bei denen der Graphit am meisten verletzt war, hatte die Kurve eine Potenzform. Bei den besten Platten aber, die nur ganz geringe Unregelmäßigkeiten aufwiesen, schien ein teilweise geradliniger Verlauf vorhanden zu sein.

Diese Untersuchung wurde im Bosscha Laboratorium, Berlin NW, Herwarthstr. 4, in der Zeit von Dezember 1912 bis Juni 1914 ausgeführt.

Herrn Professor H. du Bois möchte ich an dieser Stelle meinen besten Dank dafür aussprechen, daß er mir die Hilfsmittel seines Institutes in reichem Maße zur Verfügung stellte sowie auch für sonstiges Entgegenkommen. Herrn Dr. W. J. de Haas verdanke ich noch manche freundliche Hilfeleistung.

Lebenslauf.

Ich, George E. Washburn, wurde am 4. Oktober 1886 zu Lexington im Staate Massachusetts, U. S. A., als Sohn des Baumeisters Abram Washburn geboren. Ich widmete mich, nachdem ich die öffentlichen Schulen meines Geburtsortes besucht hatte, dem Studium der Physik am Massachusetts Institut of Technology in Boston, Massachusetts, U. S. A. Ich erwarb im Jahre 1909 den Grad eines „Bachellor of Science" (B. S.) dieses Instituts. Hierauf war ich noch zwei Jahre an derselben Stelle tätig, ein Jahr als Assistent und ein Jahr als Instruktor in der Abteilung für Physik. 1911 wurde mir das Savage-Ehrenstipendium des Instituts of Technology verliehen, um mir das Studium in Deutschland zu ermöglichen. Ich wurde im Herbst 1911 in Berlin immatrikuliert und habe seitdem fünf Semester in Berlin und ein Semester in Göttingen studiert. Ich hörte die Vorlesungen der Herren Runge, Hilbert und Riecke in Göttingen, der Herren Planck, Warburg, Erdmann, Knoblauch, Knopp, Schwarz, Grüneisen, Pohl, Adolph Schmidt und Eucken in Berlin und habe mich an den Uebungen des Herrn Planck beteiligt.

Die Promotionsprüfung bestand ich am 30. Juli 1914.